



СИБИРСКИЙ  
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

SIBERIAN  
FEDERAL  
UNIVERSITY

# Физико-химия наночастиц, наноматериалов и наноструктур

## Учебное пособие

Рекомендовано УМО вузов РФ по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, укрупненной группы направления подготовки бакалавров и магистров 210000 – «Электронная техника, радиотехника и связь» (напр. 211000.62, 211000.68).

Красноярск  
СФУ  
2011

УДК 621.38(07)  
ББК 32.85я73  
Ф48

Рецензенты:

С. Г. Овчинников, д-р физ.-мат. наук, проф. зам. директора ИФ СО РАН РФ;  
Г. Г. Назаров, канд. техн. наук, проф. кафедры ЭТТ Сиб ГАУ

Ф48 Физико-химия наночастиц, наноматериалов и наноструктур [Электронный ресурс] : учеб. пособие / авт. : А. А. Барыбин, В. А. Бахтина, В. И. Томилин, Н. П. Томилина ; разработ. : Центр обучающих систем ИнТК СФУ. – Версия 1.0. – Электрон. дан. (9 Мб). – Красноярск : СФУ, 2011. – 1 электрон. опт. диск (CD). – Систем. требования : *Intel Pentium* (или аналогичный процессор других производителей) 1 ГГц ; 512 Мб оперативной памяти ; 50 Мб свободного дискового пространства ; привод CD ; операционная система *Microsoft Windows XP / Vista / 7*. – *Adobe Reader 7.0* (или аналогичный продукт для чтения файлов формата *pdf*). – № гос. регистрации 0321103315

ISBN 978-5-7638-2396-7

Основной задачей учебного пособия является ознакомление студентов с основными классами наночастиц и наноматериалов, их физико-химическими свойствами, а также со сложившимися и перспективными областями применения наноматериалов.

Предназначено для студентов укрупненной группы направления подготовки бакалавров и магистров 210000 «Электронная техника, радиотехника и связь» (направления 211000.62, 211000.68). Может быть полезно студентам других специальностей, аспирантам и научным работникам, интересы которых связаны с получением, исследованием и практическим применением новых материалов.

---

Учебное издание

**Барыбин** Анатолий Андреевич, **Бахтина** Валентина Анатольевна,  
**Томилин** Виктор Иванович, **Томилина** Надежда Павловна

© Барыбин А. А., Бахтина В. А.,  
Томилин В. И., Томилина Н. П., 2011  
© Разработка и оформление электронного образовательного ресурса: Центр обучающих систем ИнТК СФУ, 2011  
© Сибирский федеральный университет, 2011

ISBN 978-5-7638-2396-7

Содержимое ресурса охраняется законом об авторском праве. Несанкционированное копирование и использование данного продукта запрещается. Встречающиеся названия программного обеспечения, изделий, устройств или систем могут являться зарегистрированными товарными знаками тех или иных фирм.

Подписано к использованию 15.08.2011

Объем 9 Мб. Заказ № 4858

Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79

## Оглавление

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> .....	6
<b>Глава 1. ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МАТЕРИАЛОВ И ПРИБОРОВ МАКРО-, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ</b> .....	8
1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ .....	8
1.2. МАКРОЭЛЕКТРОНИКА (технологические особенности изготовления приборов) .....	12
1.3. МИКРОЭЛЕКТРОНИКА (кремниевая технология процессоров на пути от «микро» к «нано») .....	14
1.4. НАНОЭЛЕКТРОНИКА (новые материалы и технологии) .....	19
1.4.1. Краткое описание современных нанотехнологий .....	19
<b>Глава 2. НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ</b> .....	28
2.1. Общая характеристика .....	28
2.2. Классификация наноматериалов .....	29
2.3. Углеродные нанокластеры .....	34
2.4. Квантовые особенности нанобъектов пониженной размерности .....	43
2.5. Структурно-геометрические особенности нанокластеров .....	49
<b>Глава 3. ПОВЕРХНОСТЬ И ПОВЕРХНОСТНЫЕ СТРУКТУРЫ</b> .....	55
3.1. Обозначение и индексация поверхностных структур .....	55
3.2. Релаксация поверхности .....	59
3.3. Реконструкция поверхности .....	60
3.4. Структурные дефекты реальных поверхностей .....	68
<b>Глава 4. ТЕРМОДИНАМИКА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ И МЕЖФАЗНЫХ ГРАНИЦ</b> .....	76
4.1. Способы описания нанобъектов .....	76
4.2. Общая характеристика поверхности .....	77
4.3. Элементы термодинамики плоской поверхности .....	78
4.4. Термодинамика искривленных поверхностей .....	85
4.4.1. Капиллярное давление (формула Лапласа) .....	86
4.4.2. Давление насыщенного пара частиц малых размеров (формула Гиббса – Томсона) .....	91
4.4.3. Температура плавления частиц малых размеров .....	96



<b>Глава 5. АДсорбционные явления на поверхности твердых тел .....</b>	<b>104</b>
5.1. Общая характеристика адсорбционных процессов .....	104
5.2. Физическая и химическая адсорбция .....	106
5.3. Кинетика мономолекулярной адсорбции и двухмерная конденсация .....	114
5.3.1. Модель адсорбции Ленгмюра .....	115
5.3.2. Уравнения изотермы Генри и изотермы Ленгмюра .....	119
5.3.3. Уравнение кинетики недиссоциативной адсорбции .....	120
5.3.4. Латеральное взаимодействие и двухмерная конденсация .....	124
5.3.5. Латеральное взаимодействие при локализованной монослойной адсорбции .....	131
5.4. Полимолекулярная адсорбция .....	132
5.4.1. Модель адсорбции Брунауэра – Эммета – Теллера (модель БЭТ) .....	132
5.4.2. Модель полимолекулярной адсорбции Поляни .....	138
5.5. Капиллярная конденсация в мезопористых адсорбентах .....	140
<b>Глава 6. ТЕРМОДИНАМИКА И КИНЕТИКА ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ НОВОЙ ФАЗЫ. ....</b>	<b>147</b>
6.1. Движущие силы процесса кристаллизации и зародышеобразования .....	147
6.1.1. Объемное пересыщение в первичной фазе .....	147
6.1.2. Понятие о критическом зародыше .....	151
6.2. Термодинамика и кинетика процесса зародышеобразования .....	155
6.2.1. Термодинамика гомогенного зародышеобразования .....	155
6.2.2. Термодинамика гетерогенного зародышеобразования .....	157
6.2.3. Кинетика процесса зародышеобразования .....	166
6.3. Основные стадии и механизмы формирования слоев новой фазы .....	169
6.3.1. Зародышевый механизм роста Фольмера – Вебера .....	171
6.3.2. Механизм Франка – Ван-дер-Мерве .....	179
6.3.3. Послойный беззародышевый механизм .....	180
6.3.4. Механизм Странского – Крастанова .....	182
6.3.5. Спиральный механизм роста .....	189
6.3.6. Особенности роста наноструктур на фасетированных поверхностях .....	190
<b>Глава 7. ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫЕ ВЕЩЕСТВА (термодинамические свойства и технологии) .....</b>	<b>195</b>
7.1. Общая характеристика поверхностно-активных и инактивных веществ .....	195

7.2. Технология получения наноразмерных органических пленок методом Ленгмюра – Блоджетт .....	199
7.3. Основы золь-гель технологии наноструктурированных материалов.....	205
7.3.1. Терминология и основные понятия органической химии .....	206
7.3.2. Терминология и основные понятия коллоидной химии .....	212
7.3.3. Сущность и реализация золь-гель технологии.....	216
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>222</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>223</b>
<b>ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ .....</b>	<b>224</b>
<b>ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ .....</b>	<b>229</b>
<b>Приложение.....</b>	<b>233</b>

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Высокотехнологичная электронная индустрия, сегодня во многом определяет место развитого государства в постиндустриальном информационном обществе. Примером современных достижений можно назвать кремниевые процессоры, имеющие на одном квадратном сантиметре до 300 млн транзисторов при минимальном размере элементов 45 нм. Но этот результат, хотя и является впечатляющим, не исчерпывает всех достижений ученых и инженеров, работающих над поиском и созданием новых наноэлементов.

Характерная особенность современного этапа развития технологии элементной базы электроники – это быстрое техническое освоение последних достижений в различных областях науки, таких как физика вакуума, физика плазмы, физика твердого тела и тонких пленок, физика поверхности, химическая термодинамика и кинетика, электрохимия, кристаллохимия, материаловедение и др.

Еще около двадцати лет назад ключевое направление развития электроники связывали с планарно-интегральной технологией, на основе которой изготавливали кремниевые интегральные микросхемы, приборы оптоэлектроники, акустоэлектроники, криоэлектроники и спинволновой электроники.

Но на рубеже веков произошла «нанотехнологическая революция», охватившая все жизненно важные сферы деятельности человека. По мнению большинства экспертов в области научно-технической политики, последствия развития нанотехнологий будут обширнее и глубже, чем «компьютерной революции» последней трети XX в. В настоящее время среди элементов наноэлектроники уже имеются лазеры на квантовых ямах и одноэлектронные транзисторы, изготовленные методами нанотехнологии.

Элементная база электроники включает приборы, перекрывающие огромный частотный диапазон от сверхнизких и низких звуковых частот до высоких и сверхвысоких радиочастот, кончая оптическим и рентгеновским излучением. Они выполняют самые разнообразные функции в системах передачи, приема, хранения и обработки информации.

Одно только перечисление функциональных назначений приборов свидетельствует об их огромном многообразии. Более того, это многообразие расширяется за счет различия в принципе действия, частотно-геометрических факторах и конструктивно-типовых признаках приборов. Отмеченные различия естественно порождают и многообразие технологических процессов, методов, операций и приемов изготовления электронных приборов и устройств. В основе любого технологического процесса лежит определенное физическое, химическое, электрохимическое или иное воздействие на материал с целью управляемого изменения его состояния, структуры или состава. Такой взгляд на технологические процессы позволяет выделить их базовые физико-технологические черты и увидеть общие физические закономерности, управляющие данными процессами.



В этих условиях при построении учебного курса единственно возможным и методически оправданным остается дедуктивный подход к отбору учебного материала (от общего к частному). Такой подход должен базироваться на изложении фундаментальных физических и физико-химических закономерностей, присущих различным технологическим процессам, используемым при изготовлении приборов современной электроники. Именно подобный методологический подход положен в основу построения настоящего учебного пособия. Авторский отбор материала определялся исключительно его применимостью к физико-технологическим проблемам электроники в ее нанореализациях. Бесспорно, это ограничивает круг рассматриваемых физических явлений, но позволяет в достаточно компактной форме охватить наиболее значимые технологические процессы.

Учебное пособие включает семь глав.

В первой главе дано краткое описание основных этапов развития и современное состояние технологии материалов и устройств электроники, в частности, кремниевой технологии на пути от «микро-» к «нано-».

Во второй главе дана общая характеристика наноструктурированных материалов, рассмотрена их классификация, квантовые и структурно-геометрические особенности нанообъектов пониженной размерности.

В третьей главе изложены современные основные представления о поверхности и поверхностных структурах. Рассмотрены процессы реконструкции и релаксации поверхностных атомных слоев, структурные дефекты реальных поверхностей и межфазных границ.

Четвертая глава посвящена особенностям термодинамического описания наночастиц и взаимосвязи физических свойств с геометрическими характеристиками частиц малых размеров.

Пятая глава является классической для материаловедения и освещает адсорбционные процессы на поверхности твердых тел. Рассмотрены вопросы латерального взаимодействия при локализованной монослойной адсорбции, а также двумерная конденсация и конденсация в мезапористых адсорбентах.

В шестой главе изложены современные представления о процессах зародышеобразования и формирования новой фазы. С термодинамических и кинетических позиций рассмотрены существующие модели механизмов роста и самоорганизации поверхностных структур, особенности формирования нановискеров и роста на фасетированных поверхностях.

Предмет содержания седьмой главы – поверхностно-активные и инактивные вещества и их применение в нанотехнологии. Достаточно подробно рассмотрена технология получения наноразмерных органических пленок методом Ленгмюра – Блоджетт и основы золь-гель технологии.

Для облегчения работы с учебным пособием имеется предметный указатель, список литературы, используемых терминов, определений и обозначений.